

A csepperózió hatása a homokszemcsék méret szerinti differenciálódására

KERÉNYI ATTILA

Kossuth Lajos Tudományegyetem, Debrecen

Korábbi tanulmányaimban [1, 2] áttekintést adtam a csepperózióval kapcsolatos fontosabb irodalomról, így most csak azokra a dolgozatokra hivatkozom, amelyek közvetlenül kapcsolódnak kísérleteimhez.

STEFANOVITS [4] az esőcseppek ütőhatásának mechanizmusát a következőképpen fogalmazza meg: „A nagy energiával érkező cseppek a talajfelszín pépes részeit szétfröccsentik, és lejtős területeken ez a szétfröccsenés más mennyiségű talajt szállít a lejtőn felfelé, mint lefelé. Ennek eredőjeként, a cseppek ismétlődő becsapódásának hatására, a talajrészecskék a lejtőn lefelé elmozdulnak.” Korábbi dolgozatomban adatokkal bizonyítottam, hogy a lefelé és felfelé mozgatott talajszemcsék tömegének aránya függ a lejtőszögtől [2].

Az esőcseppek talajra érkezésekor fizikai értelemben egy bonyolult ütközés játszódik le: vízcsepp ütközik szilárd testekből (talajszemcsékből) álló felülethez. Minőségi változást jelent a csepperóziós folyamatban, ha az esőcsepp már nem közvetlenül a talajszemcsékhez, hanem a felszínen áramló vízlepelhez ütközik. A német szakirodalom [3] a csepperózióknak erre a minőségileg különböző két szakaszára különböző fogalmakat használ: *Prallwirkung*, illetve *Planschwirkung*. A német nevezéktant követve a továbbiakban ezt a két szakaszt *ütöközéses*, illetve *fröccsenéses erózióknak* fogom nevezni.

Dolgozatom célja, hogy adatokkal bizonyítsam: az ütköközéses erózió különböző méretű talajszemcséket mozgat a lejtőn lefelé és felfelé, a két ellentétes irányba mozgó talajszemcsék tömegének aránya szisztematikusan változik a lejtőszög változásával, és függ az esőcseppek becsapódási energiájától. Matematikai-fizikai leírást adok a mérési adatok értelmezéséhez.

Kísérleti anyag és módszer

A kísérleteket a Kazó-féle esőztető készülékkel végeztem a Nyírségből származó homokon. Az ütköközéses erózió hatására röppályán mozgó homokszemcséket az erre a célra tervezett edények segítségével fogtam fel [2]. A felfogott homok mennyiségét szárítás után labormérlegen 0,01 g pontossággal mértem, majd szitasorozattal

meghatároztam a különböző átmérőjű szemcsék tömegét, és kiszámítottam százalékos arányukat.

A cseppenergia meghatározását fototechnikai módszerrel végeztem, a becsapódási energiát pedig úgy szabályoztam, hogy a Kazó-féle esőztető készüléket különböző magasságba helyeztem. Az alkalmazott intenzitás 35 mm/h volt. (A módszereket korábbi tanulmányomban [2] részletesen ismertettem.) A kísérletek időtartama alatt felszíni elfolyás nem volt, így csak az ütközéses erózió hatását vizsgáltam.

Eredmények

1. Az ütközéses erózió szemcseosztályozó szerepe

Vízszintes felszínen a becsapódó esőcseppek szimmetrikusan, a tér minden irányába azonos arányban mozgatják a homokszemcséket, míg a lejtős felszínhez ütköző esőcseppek lejtőirányban több homokszemcsét szállítanak. Ezekből a tényekből azt is feltételezni lehet, hogy a lejtőn megváltozik a szétfröccsenést okozó energiák térbeli eloszlása. Lejtőirányú energia-aszimmetriát feltételezve, heterogén szemcseösszetétel esetén várható, hogy a lejtőn lefelé nem csupán több, hanem átlagosan nagyobb átmérőjű szemcsék mozognak.

A feltételezés bizonyítására kísérleteket végeztem $132 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ és $821 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ energiájú (fajlagos cseppteljesítményű) esőkkel három-három lejtőszögnél. Az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

Kis energiájú esőknél 3° -os lejtőn az osztályozottság nem állapítható meg egyértelműen: párhuzamos mérések egyikében a 0,63–0,8 mm frakcióban 0,4%-nál nagyobb az eltérés a lefelé mozgó anyag javára, a másik csak század % nagyságrendű és ellentétes irányú. Ha a két nagyobb átmérőjű frakció összegét hasonlítjuk össze, akkor mindkét mérésnél arra az eredményre jutunk, hogy a lefelé mozgó durva szemcsék %-os aránya nagyobb — de a különbség minimális. A 10° -os és 14° -os meredekségű lejtőn a szemcseosztályozás teljesen egyértelmű: a legnagyobb szemcseátmérőjű frakció minden esetben jóval nagyobb %-os arányú a lefelé mozgó szemcsék esetében, mint a felfelé fröccsenőknél, sőt két esetben a legnagyobb átmérőjű frakció csak lefelé mozgott, a felfelé mozgó vízcseppek nem voltak képesek azt röppályán szállítani.

A cseppenergia jelentős növekedésével nő a röppályán mozgó szemcsék maximális átmérője: minden lefelé irányuló szemcsemozgás során találunk 1 mm-nél nagyobb átmérőjű szemcséket is. A 3° -os lejtőnél alig mutatható ki az osztályozás ténye, a 10° -osnál már két vagy három nagy átmérőjű frakció is van, amely csak lefelé mozog. Ugyanezt állapíthatjuk meg a 20° -os lejtőnél is.

A fenti tények közvetett bizonyítéku szolgálnak a cseppek üthatása során fellépő energia-aszimmetriára, amely lejtős felszíneken jön létre.

2. A lejtőn lefelé mozgó szemcsék százalékos aránya

A továbbiakban azt vizsgálom, hogy milyen mértékben befolyásolja a lejtőszög a lefelé (L) és felfelé (F) elmozduló anyagmennyiség százalékos arányát. A hétféle cseppenergiánál és ötféle lejtőszögnél négyszeres ismétléssel mért adatok átlagértékeit

1. táblázat

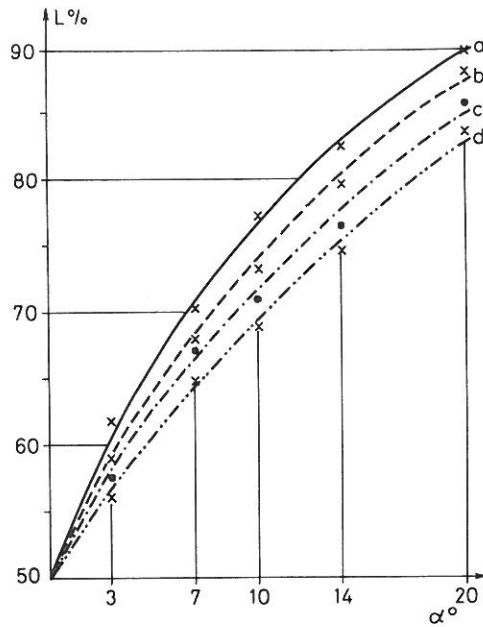
Az ütközéses erózióval lefelé és felfelé mozgatott homok mechanikai összetétele, súly-%.
[Az eső energiája: $A = 132$; $B = 821 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (fajlagos cseppteljesítmény)]

| (1) Lejtőszög- és szemcse- mozgás iránya | (2) Szemcseátmérő, mm | | | | | | | | |
|--|--------------------------|-------|----------|-----------|----------|---------|-------|--------|--------|
| | > 1 | 1–0,8 | 0,8–0,63 | 0,63–0,32 | 0,32–0,2 | 0,2–0,1 | 0,1 > | > 0,63 | > 0,32 |
| A | | | | | | | | | |
| 3° L | – | – | 0,49 | 2,11 | 16,54 | 70,89 | 9,97 | | |
| F | – | – | 0,05 | 2,41 | 16,72 | 71,30 | 9,52 | | |
| L | – | – | 0,17 | 2,74 | 19,26 | 68,86 | 8,97 | | |
| F | – | – | 0,21 | 2,40 | 18,19 | 69,12 | 10,08 | | |
| 10° | – | – | 0,07 | 2,18 | 23,66 | 63,98 | 10,11 | | |
| F | – | – | 0,10 | 2,22 | 23,24 | 64,26 | 10,18 | | |
| L | – | – | 0,11 | 2,26 | 24,70 | 62,17 | 10,76 | | |
| F | – | – | 0,00 | 1,99 | 22,04 | 64,76 | 11,21 | | |
| 14° L | – | 0,08 | 0,10 | 2,40 | 21,61 | 65,24 | 10,57 | | |
| F | – | 0,00 | 0,06 | 2,14 | 21,80 | 65,35 | 10,65 | | |
| L | – | – | 0,08 | 2,46 | 20,37 | 65,88 | 11,21 | | |
| F | – | – | 0,03 | 2,05 | 23,42 | 63,20 | 11,30 | | |
| B | | | | | | | | | |
| 3° L | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 3,22 | 20,51 | 65,82 | 10,38 | 0,07 | 3,29 |
| F | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 2,58 | 23,47 | 63,94 | 9,91 | 0,10 | 2,68 |
| L | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 2,96 | 21,82 | 65,00 | 10,11 | 0,11 | 3,07 |
| F | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 2,69 | 22,93 | 64,29 | 10,03 | 0,06 | 2,75 |
| 10° L | 0,11 | 0,20 | 0,19 | 1,04 | 24,36 | 68,87 | 5,23 | 0,50 | 1,54 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,67 | 18,11 | 71,91 | 9,28 | 0,03 | 0,70 |
| L | 0,08 | 0,04 | 0,09 | 3,76 | 22,83 | 62,36 | 10,84 | 0,21 | 3,97 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 3,02 | 19,86 | 61,96 | 15,03 | 0,13 | 3,15 |
| 14° L | 0,01 | 0,08 | 0,13 | 1,77 | 18,66 | 64,80 | 14,55 | 0,22 | 1,99 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,39 | 17,54 | 70,36 | 10,71 | 0,00 | 1,39 |
| L | 0,12 | 0,19 | 0,21 | 2,99 | 20,79 | 65,46 | 10,24 | 0,52 | 3,51 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,86 | 19,12 | 69,12 | 9,90 | 0,00 | 1,86 |

használtam fel számítási alapul [2]. Ha az L + F értékeket tekintjük 100%-nak, a könnyebb áttekinthetőség érdekében elegendő a lejtőn lefelé mozgó szemcsék százalékos arányát (L%) megadni (2. táblázat), hiszen a lejtőn felfelé mozgó szemcsék százalékos aránya (F%) ebből egyszerűen számítható adat: $F\% = 100\% - L\%$. Vízszintes felszínen $L\% = 50$ és $F\% = 50$, ezért ha az adatokat a lejtőszög függvényében koordináta-rendszerben ábrázoljuk, az origóban $L\% = 50$ lesz (1. ábra). A lejtőszög növekedésével először gyorsan, majd fokozatosan lassuló ütemben nő az L% értéke. 132 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ cseppenergiánál 20°-os lejtőn már az L + F tömegnek 90%-a lefelé mozog. Az ábra azt is bizonyítja, hogy növekvő becsapódási energiáknál szisztematikusan csökken az azonos lejtőszöghöz tartozó L%. Ennek a jelenségnek a magyarázatát az esőcseppek ütközési mechanizmusában kereshetjük.

3. Az ütközéses erózió jelenségeinek fizikai magyarázata

Az ütközéses erózió folyamata rendkívül összetett, amit számos tényező együttes hatása határoz meg. Bizonyítani kívánom, hogy az 1. és 2. alatt ismertett mérési eredmények az ütközésre vonatkozó fizikai ismereteink alapján megfelelően értelmezhetők.



1. ábra

A lefelé mozgó szemcsék százalékos arányának ($L\%$) változása a lejtőszög (α) függvényében, különböző cseppenergiáknál (fajlagos cseppteljesítményeknél) nyírségi homokon. a) 132; b) 403; c) 673; d) $821 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Az esőcsepp, ha tömege m és sebessége v , akkor mozgási energiája $E = \frac{1}{2}mv^2$ és impulzusa $\vec{p} = m\vec{v}$ ($a \rightarrow$ jellel azt jelölöm, hogy az impulzus és a sebesség vektormennyiség).

A talajra érkezés után az esőcsepp sok kis cseppecskére esik szét, amelyek a talajrészecskéket magukkal ragadva szétrepülnek. Ez a folyamat végeredményben bonyolult ütközésként fogható fel, ahol E, \vec{p} az ütközés előtti energia ill. impulzus, míg az ütközés utáni energia $E' = \sum_i \frac{1}{2} m'_i v_i^2$, ill. impulzus $\vec{p}' = \sum_i m'_i \vec{v}_i$, ahol az m'_i jelenti a szétfröccsenő szuszpenziócsepp tömegét, aminek egy része m_i tömegű víz, másik része a felragadott m''_i tömegű talajrészecske, tehát $m'_i = m_i + m''_i$.

Mivel a talajra érkező víztömeg egy része a talajon marad

$$\sum_i m_i < m.$$

2. táblázat

A lejtőn lefelé elmozdult homokszemcsék %-os aránya
az (L + F) százalékában különböző lejtőszögeknel és cseppenergiáknál
(fajlagos cseppteljesítményeknél)

| (1) Lejtőszög | (2) Cseppenergia, $J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ | | | | | | |
|------------------|--|------|------|------|------|------|------|
| | 132 | 253 | 438 | 589 | 673 | 762 | 821 |
| 3° \bar{X} | 61,8 | 59,8 | 59,4 | 57,8 | 57,3 | 56,7 | 56,2 |
| s | 0,82 | 0,56 | 1,32 | 1,32 | 1,41 | 0,70 | 0,64 |
| s% | 1,3 | 0,9 | 2,2 | 2,3 | 2,5 | 1,2 | 1,1 |
| 7° \bar{X} | 70,7 | 69,0 | 68,3 | 67,4 | 66,7 | 65,3 | 64,8 |
| s | 0,84 | 0,45 | 0,7 | 1,75 | 0,54 | 0,68 | 0,89 |
| s% | 1,2 | 0,7 | 1,0 | 2,6 | 0,8 | 1,0 | 1,4 |
| 10° \bar{X} | 77,5 | 75,9 | 73,6 | 71,3 | 71,2 | 70,2 | 69,3 |
| s | 1,36 | 0,71 | 0,44 | 0,85 | 0,96 | 0,45 | 0,83 |
| s% | 1,8 | 0,9 | 0,6 | 1,2 | 1,4 | 0,6 | 1,2 |
| 14° \bar{X} | 83,2 | 82,7 | 80,2 | 77,0 | 76,6 | 75,5 | 75,0 |
| s | 0,59 | 1,37 | 0,81 | 1,62 | 0,56 | 0,79 | 0,88 |
| s% | 0,7 | 1,7 | 1,0 | 2,1 | 0,7 | 1,1 | 1,2 |
| 20° \bar{X} | 89,8 | 89,3 | 88,7 | 86,3 | 86,5 | 84,6 | 84,2 |
| s | 0,79 | 0,92 | 0,66 | 1,28 | 1,19 | 0,96 | 0,73 |
| s% | 0,9 | 1,0 | 0,7 | 1,5 | 1,4 | 1,1 | 0,9 |

A megmozgatott talaj esőcseppként $m'' = \sum_i m_i''$.

Az $m_i + m_i''$ tömegű szuszpenziócsepp sebessége \vec{v}_i .

Az esőcsepp szétesésekor bekövetkező deformáció, talajtömörödés és szerkezetrombolás egyaránt energiát emészt fel. Tehát $E > E'$, vagyis az ütközés rugalmatlan. Az $\eta = \frac{E'}{E}$ viszony függ a sebességtől. Az ütközés kis sebességnél csaknem teljesen rugalmatlan: $\eta = 0$ (nincs szétfröccsenő víz, talaj), míg nagyobb sebességeknél a csepp-és talajdeformációra fordítódó energia értéke ($E - E'$) alig változik, állandónak vehető, jelöljük ezt E_d -vel

$$\eta = 1 - \frac{E_d}{E(v)}.$$

Ha tehát nő a v , $E v^2$ -tel arányosan nő, így η is nő. Nagy sebességeknél η 1-hez tart, ami úgy is kifejezhető, hogy az ütközés egyre inkább „rugalmas” jellegű lesz. Ezt mérésekkel igazoltam (3. táblázat).

A talajszemcsék mozgására vonatkozóan p' impulzus ismerete a mérvadó (2. ábra). Az m_i'' talajrészecske a talajfelszínről \vec{v}_i sebességgel indul. A $\vec{v}_1, \vec{v}_2 \dots$ minden irányban beállhat, így talajszétröpítés minden irányban bekövetkezik.

Egyetlen csepp esetén a lefelé, ill. felfelé elmozduló tömeg legyen m_l , ill. m_f .

$$m_i'' = m_l + m_f.$$

3. táblázat

Az ütközés során elmozdult anyag víz : homok aránya 22° C-os vízhőmérsékleten és vízszintes felszínen (cseppátmérő: 4 mm)

| (1) Esési sebesség, m/s | (2) A homok kezdeti nedvességtartalma, súly-% | (3) Cseppek | | (4) Beszívárgott víz, g | (5) Szétfröccsent | | |
|----------------------------------|--|----------------|-----------|-------------------------------|----------------------|--------|-----------------------------|
| | | | | | víz | homok | víz az összes víz %-ában |
| | | száma | tömege, g | | g | | |
| 2,75 | 11,2 | 52 | 1,7420 | 1,6015 | 0,1405 | 0,0968 | 8,1 |
| 3,80 | 11,8 | 56 | 1,8760 | 1,7080 | 0,1680 | 0,1355 | 9,0 |
| 5,00 | 10,9 | 51 | 1,7085 | 1,4529 | 0,2556 | 0,1934 | 15,0 |

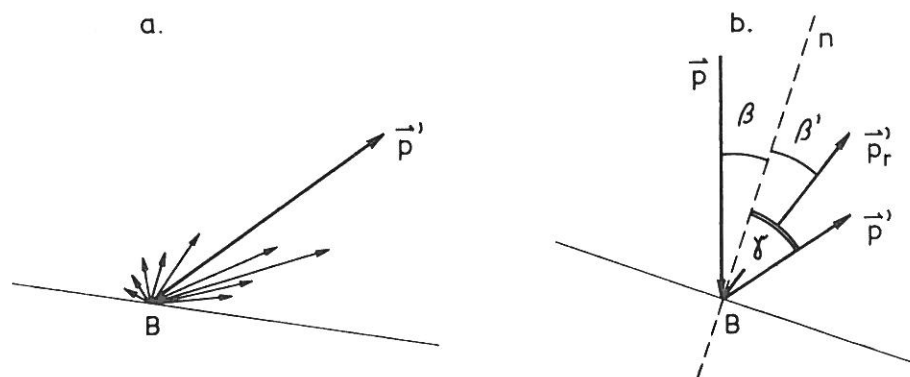
Mivel $p' = \sum_i m_i' v_i'$, tehát p' átlagban jellemzi a talajmozgás jellegét, tendenciáját (2/a. ábra).

Az energetikai megfontolás azt mutatja, hogy a rugalmas ütközés ($\eta = 1$) egy rendkívül idealizált határeset, ami $v \rightarrow \infty$ esetén valósulna meg, de v növekedésével a valóságos ütközés egyre inkább megközelíti ezt. Ha a p_r a rugalmas ütközés utáni impulzus, akkor a p és p_r a beesési merőlegesssel (az ütközés pontjában a felszínre állított képzeletbeli merőleges egyenes — a 2/b. ábrán n) ugyanakkora szöget zár be. A 2. ábrán $\beta = \beta'$. Az $\eta < 1$ esetben $\gamma > \beta'$.

Mérésekkel igazoltam (3. táblázat), hogy a v növekedésével az $m_i'' = m_i + m_f$ nő.

De a $\xi = \frac{m_i}{m_f}$ viszonyt p' iránya határozza meg. Ha ugyanis γ csökken, a lefelé és felfelé terítés aránya is csökken, míg ha növekszik, ellentétes értelmű a változás.

Növekvő v -vel $\eta \rightarrow 1$, tehát $\gamma \rightarrow \beta = \beta'$, azaz ξ is csökken, ami magyarázatot ad az 1. ábra mérési eredményeire. Az 1. ábra sokezer esőcsepp becsapódásakor mért



2. ábra

Magyarázó ábra az esőcseppek ütközései eróziójának fizikai leírásához. (Részletesen lásd a szövegben.) a) A lejtős felszínen szétfröccsenő szuszpenziócseppek impulzusai és azok eredője; b) Lejtős felszínre becsapódó esőcsepp impulzusa és a szétfröccsenő szuszpenziócseppek impulzusainak eredője rugalmas és rugalmatlan ütközés esetén. B: az esőcsepp becsapódási pontja; \vec{p} : a beeső csepp impulzusa; \vec{p}' : a szétfröccsenő szuszpenziócseppek impulzusainak eredője; \vec{p}_r : a rugalmas ütközés utáni impulzus; n : ütközési normális

arányokat tükrözi, az egyedi cseppre vonatkozó bizonyítás mégis megfelelő fizikai leírást ad a bonyolult ütközési folyamatra. Ez arra utal, hogy a *stabil laboratóriumi mérési eredmények* (kis szórás és variációs koefficiens) *statisztikusan érvényesülő törvényszerűségeket takarnak*. A „tölcseres” méréseim (2) arra is példákkal szolgáltak, hogy a valóságban az egyedi becsapódások — ütközéses erózió esetén — nem okoznak a tér minden irányába röppályás szemcsemozgást. *Nagyszámú csepp* becsapódásakor azonban az összes ütközés eredője megbízhatóan azonos volt, ami a folyamat egyedi cseppel való leírását is lehetővé tette.

A bizonyításból az is következik, hogy az esőcseppek szétfröccsenésekor a függőlegesre nézve lejtőirányú impulzus és energia aszimmetria létezik, ami indokolja a szemcsék osztályozását is.

Összefoglalás

A Kazó-féle esőztető készülék felhasználásával csepperóziós kísérleteket végeztünk a Nyírségből származó homokon. A kísérletek során felszíni elfolyás nem volt, így a homokszemcsék az esőcseppek hatására csak röppályán mozogtak. A mérések azt bizonyították, hogy meredekebb lejtőkön a nagyobb átmérőjű homokszemcsék nagyobb arányban röpködnek lefelé, mint felfelé (1. táblázat). A szemcsék ilyen jellegű osztályozása fokozottabb volt nagy cseppenergiánál. A lefelé szállított homokszemcsék összes tömegét (L) a lefelé és felfelé (F) szállított homok tömegéhez (L + F) viszonyítottuk. Ez utóbbit 100%-nak vettük, és ennek százalékában fejeztük ki az L értékeit (2. táblázat). Az adatokat koordináta-rendszerben ábrázolva (1. ábra) látható, hogy minél nagyobb a cseppenergia, annál kisebbek az azonos lejtőszöghöz tartozó L% értékek.

A mérési eredmények értelmezésére a csepperózióknak erről a szakaszáról matematikai-fizikai leírást adtunk. Az esőcseppek becsapódását bonyolult ütközésnek fogtuk fel. A bizonyítás egyedi cseppre vonatkozott (2. ábra). Az 1. ábra sokezer esőcsepp becsapódásakor mért arányokat tükrözi, az egyedi cseppre vonatkozó bizonyítás mégis megfelelő leírást adott a bonyolult ütközési folyamatra. Ez arra utal, hogy a *stabil laboratóriumi mérési eredmények* (kis szórás és variációs koefficiens) *statisztikusan érvényesülő törvényszerűségeket takarnak*. A matematikai-fizikai leírást a csepperózióknak csak arra a szakaszára tartjuk érvényesnek, amikor még nincs felszíni lefolyás.

Irodalom

- [1] KERÉNYI A.: A csepperózió törvényszerűségeinek kvantitatív vizsgálata kísérleti körülmények között. *Földrajzi Értesítő*. **30**. 205—233. 1981.
- [2] KERÉNYI A.: Mesterséges eső ütóhatásának kvantitatív vizsgálata modellkísérletekben homokon. *Agrokémia és Talajtan*. **31**. 165—178. 1982.
- [3] KURON, H. & STEINMETZ, H. J.: Die Planschwirkung von Regentropfen als ein Faktor der Bodenerosion. *Assemblée Gén. de Tronto*, 3—14. Sept. 1957. Tom. 1. Publ. **43**. IAHS. Gentbrugge. 115—121. 1958.
- [4] STEFANOVITS P.: *Talajtan*. Mezőgazd. Kiadó. Budapest. 1975.

Érkezett: 1983. október 19.

The Effect of Drop Impact Erosion on the Size Differentiation of Sand Particles

A. KERÉNYI

Dept. of Geography, L. Kossuth University, Debrecen (Hungary)

Summary

Experiments were conducted with Kazó's rainfall simulator to study drop impact erosion on a sandy soil from the Nyírség region of Hungary. Surface runoff did not occur, thus the sand particles detached by raindrops moved along trajectories. The measured data indicate that on steeper slopes a higher proportion of sand particles larger in diameter moved downslope than upslope (Table 1). At higher drop energy this differentiation of sand particles is more pronounced. The total amount of sand particles transported downslope (L) was compared to the amount of sand splashed downslope and upslope (L + F). Taking the latter amount for 100%, L values were expressed in the percentage of L + F (Table 2). The graphs in Fig. 1 clearly show that the higher the drop energy, the lower are the L % values corresponding to the same slope angle.

The mathematical-physical description of this phase of drop impact erosion was given for the interpretation of the measured data. The impact of raindrops was considered as a complex collision; E and \vec{p} represent energy and momentum before collision, respectively, while E' and \vec{p}' indicate energy and momentum after collision. The demonstration related to a single drop. The deformation, the increasing compactness and the structural damage of the soil consume energy at the moment when the raindrop breaks, thus $E > E'$, that is, the collision is inelastic. (Collision coefficient: η .)

The movement of soil particles is determined by \vec{p}' momentum (Fig. 2/a). \vec{p}' characterizes the nature and tendency of soil transport.

In the case of the collision of one drop, m_i'' stands for the bulk of detached soil particles, while m_i and m_f represent the amount of soil splashed downslope and upslope, respectively.

With the increase of drop velocity (v) the collision becomes less and less elastic, but it can never become perfectly elastic ($\eta = 1$). If \vec{p}_r' represents the momentum after elastic collision, then \vec{p} and \vec{p}_r' form the same angle with the surface normal (n). In Fig. 2/b $\beta = \beta'$. If $\eta < 1$, then $\gamma > \beta'$.

The measured data proved (Table 3) that with an increase in v , m_i'' increased, too. But $\xi = m_i/m_f$ is determined by the direction of \vec{p}' , because if γ decreases, then the proportion of downslope and upslope spreading of particles decreases as well. If γ increases, a reverse change may be observed.

With increasing drop velocity (v) $\eta \rightarrow 1$, thus $\gamma \rightarrow \beta = \beta'$, that is ξ is decreasing, which explains the data in Fig. 1.

Fig. 1 shows the proportions measured at the impact of thousands of raindrops, but the demonstration related to a single drop has yielded a suitable description of the complex impact process. This indicates that the reliability of the measurements (with slight standard deviation and low coefficient of variation) carried out in the laboratory represent statistically prevailing regularities. The mathematical-physical description presented in this paper is valid only for that phase of drop impact erosion, when there is no surface runoff.

Table 1. Mechanical composition (in weight percent) of sand splashed downslope and upslope by drop impact erosion. [Drop energy: A = 132; B = 821 J · m⁻² · h⁻¹ (specific erosive capacity)] (1) Slope angle and direction of particle movement. L = downslope; F = upslope. (2) Particle size (diameter), mm.

Table 2. Percental proportion of sand particles splashed downslope as a percent of L + F, at various slope angles and drop energies (specific erosive capacities of the drops). (1) Slope angle \bar{X} : mean; s: standard deviation; s %: coefficient of variation. (2) Drop energy.

Table 3. The water: sand ratio in the splash material at 22 °C of water temperature on a level surface (drop size: 4 mm in diam.). (1) Drop velocity, m/s. (2) Initial moisture content of the sand, weight percent. (3) Number and mass of drops, g. (4) Water infiltrated into the sand, g. (5) Splashed water and sand (g), as well as splashed water as a percent of total moisture.

Fig. 1. Change in the percental proportion (L%) of sand particles splashed downslope as a function of slope angle (α), at various drop energies (specific erosive capacities of the drops). a) 132; b) 403; c) 673; d) $821 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

Fig. 2. Illustration to the physical description of drop impact erosion. (See in the text in detail.) a) Momenta of suspension drops splashed on a slope and their resultants. b) Momentum of a raindrop falling on a slope and the resultants of splashed suspension drops in the case of elastic and inelastic collisions. B: point of collision of raindrop; \vec{p} : momentum of the drop; \vec{p}' : resultant of the momenta of splashed suspension drops; \vec{p}_r : momentum of drop after elastic collision; n : surface normal,

Wirkung der Tropfenerosion auf die Differenzierung der Sandkörnchen

A. KERÉNYI

Universität „Kossuth Lajos“, Debrecen (Ungarn)

Zusammenfassung

Es wurden Versuche betreffs der Erosion der Regentropfen mit Hilfe der Regenanlage nach Kazó auf aus dem Gebiet „Nyírség“ stammenden Sandböden durchgeführt. Während der Versuche entstand kein Wasserablauf auf der Oberfläche, demzufolge konnten sich die Sandkörnchen auf Einwirkung der Regentropfen nur auf einer Flugbahn bewegen. Die Messungen haben bewiesen, dass bei steileren Abhängen die Sandkörnchen von einem grösseren Durchmesser in bedeutenderem Ausmass nach unten als nach oben fliegen (Tab. 1). Bei grösserer Tropfenenergie erfolgte die Differenzierung der Sandkörnchen in gesteigertem Masse. Die gesamte Menge der nach unten beförderten Sandkörnchen (L) wurde mit derjenigen der nach unten und oben beförderten (L + F) verglichen. Letztere Werte wurden für 100% angenommen, und die L-Werte wurden in deren Prozents ausgedrückt (Tab. 2). Die Angaben in einem Koordinatensystem dargestellt (Abb. 1) zeigen, dass die zu einem gegebenen Abhangwinkel gehörenden L%-Werte umso kleiner werden, je grösser die Tropfenenergie ist.

Zur Erklärung der Messergebnisse haben wir über diesen Abschnitt der Tropfenerosion eine mathematisch-physikalische Beschreibung gegeben. Laut dieser wurde der Einschlag der Regentropfen als ein kompliziertes Aufeinanderprallen aufgefasst, wo E und \vec{p} die Energie, bzw. den Impuls vor dem Zusammenstossen, bzw. E' und \vec{p}' die Energie, bzw. den Impuls nach dem Zusammenstossen darstellen. Die Beweisführung bezog sich auf einen einzelnen Tropfen. Die Deformation, die Bodenverdichtung und -vernichtung die bei dem Auseinanderspritzen der Regentropfen entstehen, verbrauchen gleichförmig Energie, folglich ist $E > E'$, d. h. der Zusammenstoss ist unelastisch (Koeffizient des Zusammenstosses = η).

Betreffs der Bewegung von Bodenteilchen ist die Kenntnis des Impulses \vec{p}' massgebend (Abb. 2/a). \vec{p}' kennzeichnet im Durchschnitt den Charakter und die Tendenz der Bodenbewegung.

Im Falle eines einzigen Tropfens bezeichnet m_i'' die Menge der sich fortbewegten Bodenteilchen, während m_i , bzw. m_f die sich nach unten bzw. nach oben wegbewegte Bodenmenge bedeuten.

Mit Zunahme der Tropfengeschwindigkeit (v) wird das Zusammenstossen immer elastischer, aber ein rein elastischer Zusammenstoss ($\eta = 1$) erfolgt nie. Wenn \vec{p}' der Impuls nach dem elastischen Zusammenstoss ist, dann schliessen \vec{p} und \vec{p}' mit dem Einfallslot (n) den gleichen Winkel ein. Auf der Abb. 2/b $\beta = \beta'$. Im Falle von $\eta < 1$ ist $\gamma > \beta'$.

Die Messungen haben bewiesen (Tab. 3), dass mit der Zunahme von v auch m'_i zunimmt.

Aber das Verhältnis von $\xi = \frac{m_i}{m_f}$ wird durch die Richtung von \vec{p}' bestimmt. Nimmt nämlich γ ab, so vermindert sich auch das Verhältnis der Ausbreitung nach unten und oben, während bei Zunahme die Änderung in entgegengesetztem Sinne erfolgt.

Bei Zunahme von v hält $\eta \rightarrow 1$, folglich hält $\gamma \rightarrow \beta = \beta'$, d. h. ξ nimmt auch ab, wodurch man eine Erklärung für die Messresultate in Abb. 1 erhält.

Abb. 1 widerspiegelt die Verhältnisse gemessen beim Aufprallen von vielen tausend Regentropfen, trotzdem hat der Nachweis bezüglich eines einzigen Regentropfens eine entsprechende Beschreibung des komplizierten Ablaufs dieses Vorganges erbracht. Dies weist darauf hin, dass sich die stabilen Messresultate gewonnen im Laboratorium (geringe Streuung und Variationskoeffizient) mit den statistisch zur Geltung kommenden Gesetzmässigkeiten decken. Die mathematisch-physikalische Beschreibung gilt nur für jenen Abschnitt der Tropfenerosion bei dem noch kein Wasserablauf auf der Oberfläche auftrat.

Tab. 1. Körnung des bei dem Aufprall der Regentropfen nach unten und nach oben beförderten Sandes, Gewicht%. [Energie des Regens: A = 132; B = 821 J · m⁻² · h⁻¹ (spezifische Tropfenleistung)] (1) Winkel des Abhangs und Richtung der Körnchenbewegung. L = nach unten; F = nach oben. (2) Durchmesser der Körnchen, mm.

Tab. 2. Prozentuelles Verhältnis der nach unten beförderten Sandkörnchen (L) zu dem (L + F)-Wert, bei verschiedenen grossen Abhangswinkeln und Tropfenenergien (bzw. spezifischen Tropfenleistungen). (1) Abhangswinkel. \bar{X} : mathematischer Mittelwert; s: Streuung; s%: Variationskoeffizient. (2) Tropfenenergie.

Tab. 3. Proportion von Wasser:Sand des durch den Zusammenstoss fortbewegten Materials bei 22 °C Wassertemperatur und auf horizontaler Oberfläche (Tropfendurchmesser 4 mm). (1) Geschwindigkeit beim Fallen, m/s. (2) Anfänglicher Feuchtigkeitsgehalt des Sandes, Gewicht%. (3) Anzahl und Masse der Tropfen, g. (4) Sickerwasser, g. (5) Verspritztes Wasser und Sand, g, sowie Menge des verspritzten Wassers in Prozenten der gesamten Wassermenge.

Abb. 1. Änderung der perzentuellen Proportion der sich nach unten bewegenden Sandkörnchen (L%) in der Funktion des Abhangswinkels (α) bei verschiedenen Tropfenenergien (bzw. spezifischen Tropfenleistungen) auf Sand aus dem Gebiet „Nyírség“. a) 132; b) 403; c) 673; d) 821 J · m⁻² · h⁻¹.

Abb. 2. Skizze zur Erklärung der physikalischen Beschreibung der durch Aufprall von Regentropfen verursachten Erosion (siehe ausführlich im Text). a) Impulse der auf der Abhangsebene auseinander spritzenden Suspensionstropfen und deren Resultante. b) Impuls der auf die Oberfläche des Abhangs aufprallenden Regentropfen und die Resultanten der auseinanderspritzenden Suspensionstropfen bei elastischem und unelastischem Zusammenstoss. B: Stelle des Aufpralls von Regentropfen; \vec{p} : Impuls des aufprallenden Tropfens; \vec{p}' : Resultante der Impulse der auseinanderspritzenden Suspensionstropfen; \vec{p}_r : Impuls nach elastischem Zusammenstoss; n = Normale des Zusammenstosses (Einfallslot).

Влияние капельной эрозии на дифференцирование по размерам песчаных частиц

А. КЕРЕНИ

Университет им. Л. Кошута, Дебрецен (Венгрия)

Резюме

Используя дождевальную установку Казо, на песке из Ниршега провели опыты, связанные с капельной эрозией. В опытах поверхностного стока не было, поэтому песчаные частицы под влиянием падающих капель двигались только по троектории. Измерения показали, что на более крутых склонах большая часть крупных песчаных частиц летит вниз и меньшая их часть вверх (Табл. 1). Подобного рода распределение песчаных частиц было значительнее при более значительной капельной энергии. Общую массу песчаных частиц (L) отнесли к массе песка, переносимой вниз и вверх ($L + F$). Последнее приняли за сто, и в его процентах выразили величины L (Табл. 2). Результаты, изображенные в системе координат (Рис. 1), показали, что чем выше капельная энергия, тем ниже величины $L\%$, относящиеся к одной и той же крутизне склона.

Для оценки результатов измерения дали физико-математическое описание этой стадии капельной эрозии, сущность которого заключается в следующем. Удар падающих капель приняли за сложное столкновение, где E, \vec{p} энергия перед столкновением или импульс, энергию после столкновения обозначили через E' , импульс — через \vec{p}' . Доказательство действительно для единичных капель. Деформация, уплотнение почвы и разрушение структуры в диапазоне распада дождевой капли в равной степени поглощают энергию, таким образом $E > E'$ т. е. столкновение не упругое (Коэффициент столкновения $= \eta$). Импульс является показателем в отношении движения почвенных частиц (Рис. 2/а). \vec{p}' в среднем показывает характер, тенденцию передвижения почвенных частиц.

Для одной капли масса сдвинутых почвенных частиц m_i' масса почвыдвигающаяся вниз или вверх m_i и m_f .

По мере увеличения скорости падения капель (V) столкновение становится более упругим, но упругого столкновения достичь нельзя ($\eta = 1$). Если \vec{p}' есть импульс после упругого столкновения, то \vec{p} и \vec{p}' с перпендикуляром падения (n) образуют одинаковые углы. На рисунке 2/б $\beta = \beta'$. В случае $\eta < 1, \gamma > \beta'$.

Измерениями доказано (Табл. 3), что с увеличением v увеличивается и m_i' . Но условия $\xi = \frac{m_i}{m_f}$ определяются направлением \vec{p}' . Если γ снижается, соотношение движения вверх и вниз также снижается, если увеличивается, изменение приобретает противоположный смысл.

С увеличением $v \rightarrow 1$, т. е. $\gamma \rightarrow \beta = \beta'$, значит ξ снижается, что дает объяснение относительно результатов измерения, приведенных на рисунке 1.

Рисунок 1. отражает соотношения, измеренные в момент падения нескольких тысяч капель, но все же доказательство, относящееся к отдельной капле, дает соответствующее описание сложного процесса столкновения. Это показывает, что стабильные лабораторные измерения (небольшое рассеивание данных, невысокие коэффициенты вариации) вскрывают статистически проявляющиеся закономерности. Физико-математическое описание капельной эрозии действительно только для стадии, в которой поверхностный сток отсутствует.

Табл. 1. Механический состав песка, сдвинутого вверх и вниз капельной эрозией, в весовых процентах. [Энергия дождя: $A = 132$; $B = 821 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (удельная производительность капель).] (1) Угол крутизны склона и направление движения частичек. L = вниз; F = вверх; (2) Диаметр частичек, мм.

Табл. 2. Соотношение песчаных частиц, сдвинутых вниз по склону ($L\%$) в процентах от ($L + F$), при различной крутизне склона и энергии капель (удельной производительности капель). (1) Угол крутизны склона. \bar{X} : средняя математическая величина; s : рассеивание данных; $s\%$ вариационный коэффициент. (2) Энергия капель.

Табл. 3. Соотношение вода: песок в материале, сдвинутом в момент столкновения при температуре воды 22°C и на горизонтальной поверхности (диаметр капель: 4 мм). (1) Скорость падения, m/s . (2) Начальная влажность песка, в весовых процентах. (3) Количество и масса капель, г. (4) Просачившаяся вода, г. (5) Разбрызганная вода и песок, г, а также разбрызганная вода в % от всей воды.

Рис. 1. Изменение процентного соотношениядвигающихся вниз частиц ($L\%$) в зависимости от крутизны склона (α), при различной энергии капель (удельной производительности капель), на ниршегском песке. а) 132; б) 403; в) 673; г) $821 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

Рис. 2. Объяснительная таблица для физического описания капельной эрозии (подробно смотри в тексте). а) Импульсы капель суспензии, разбрызгивающихся на склоновой поверхности и их равнодействующие. (Импульсы дождевых капель, падающих на склоновую поверхность и равнодействующие разбрызгивающихся капель суспензии в случае упругого и не упругого столкновения. V : точка удара дождевой капли. \vec{p} : импульс падающей капли. \vec{p}' : равнодействующая импульсов разбрызгивания капель суспензии. \vec{p}_r' : импульс после упругого столкновения. n : нормальное столкновение.